



## Estudo sobre Linhas de Transmissão não Lineares Giromagnéticas

GRECO, A.F.G<sup>1</sup>, ROSSI, J.O<sup>2</sup>, BARROSO, J.J<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Doutoranda em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais – ETE/CSE.

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Plasma / Coordenação de Laboratórios Associados  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

anaflaviaguedesgreco@gmail.com

---

**Resumo.** Linhas de transmissão não lineares (LTNLs) são dispositivos empregados para gerar radiofrequência (RF) sem o emprego de tubos eletrônicos a vácuo e de filamento termiônico. Representam uma nova alternativa para gerar RF sem o emprego de feixe de elétrons, podendo ser basicamente de dois tipos: a) uma linha discreta, onde pelo menos um componente deve ser não linear (L ou C) ou b) uma linha coaxial contínua, denominada de giromagnética. Com base em trabalhos que vêm sendo desenvolvidos no país e no exterior, o presente trabalho apresenta um estudo sobre LTNLs giromagnéticas, tendo em vista que esta linha é capaz de gerar pulsos oscilatórios mais intensos em frequências mais altas (acima de 1 GHz) do que a linha discreta.

---

**Palavras-chave:** Linhas de Transmissão não Lineares, Geração de RF, Giro-magnetismo.

### 1. Introdução

Uma linha de transmissão não linear (LTNL) é uma linha de transmissão periodicamente carregada com elementos não lineares, sejam varactores ou indutores saturados. Devido ao rápido avanço da tecnologia de circuitos eletrônicos demandando um contínuo aumento na frequência de operação de circuitos integrados, as interconexões entre dispositivos eletrônicos podem se comportar nesta circunstância como linhas de transmissão.

Linhas de transmissão são amplamente usadas na conexão de rádio transmissores e receptores com antenas e também na distribuição de sinais entre sistemas de comunicação. Além disso, apresentando a habilidade de manipular e conformar sinais de alta potência com a finalidade de concentrar e liberar pulsos intensos de energia utilizando sistemas compactos



de dimensões reduzidas, linhas de transmissão de potência pulsada constituem uma tecnologia de interesse na área espacial e em defesa.

Estudos no Brasil e no exterior estão sendo feitos no sentido de gerar rádio frequência de alta potência para diversas aplicações, como por exemplo, em sistemas embarcados no espaço usando sistemas compactos sem emprego de tubos eletrônicos.

Com essa motivação, propõe-se neste trabalho um estudo sobre estas linhas de transmissão não lineares giromagnéticas, que representam uma nova alternativa para gerar RF sem o emprego de feixe de elétrons.

## 2. Metodologia

### 2.1 Conceitos de LTNLs

LTNLs vêm sendo estudadas para geração de sinais de alta potência com aplicações em radares, plataformas móveis de defesa e satélites. Seu funcionamento se baseia no comportamento não linear de seus componentes eletrônicos capacitores e ou indutores em função da tensão e corrente elétrica aplicada. Em aplicações para geração de rádio frequência, as vantagens das linhas de transmissões não lineares é que estas não necessitam de filamento termoiônico nem de fontes auxiliares de alta tensão ou oscilador local de alimentação como os tubos amplificadores de RF (conhecidos como TWTs - Travelling Wave Tubes), o que permite a construção de sistema de alta potência com tamanho e peso reduzido. Também em relação aos SSPAs (Solid State Amplifiers), LTNLs seriam mais eficientes dependendo do nível de potência de saída exigido, uma vez que SSPAs, como TWTs, exigem um oscilador local e fontes auxiliares, porém de mais baixa tensão [SILVA NETO, 2016].

LTNLs podem ser basicamente de dois tipos:

(a) Linha discreta composta por uma seção periódica de indutores e/ou capacitores não lineares, conforme ilustram a Figura 1 e a Figura 2:

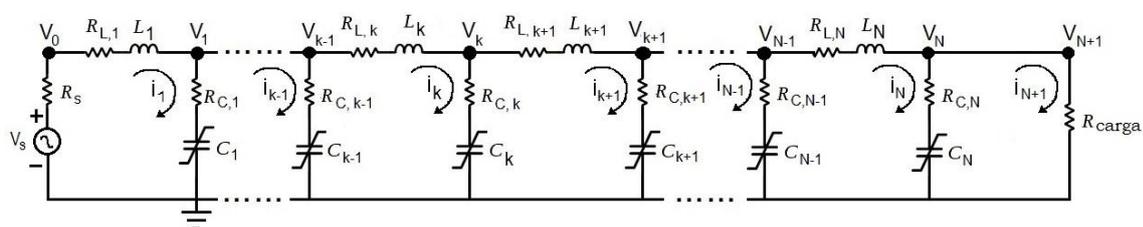


Figura 1: Linha discreta do tipo LC.

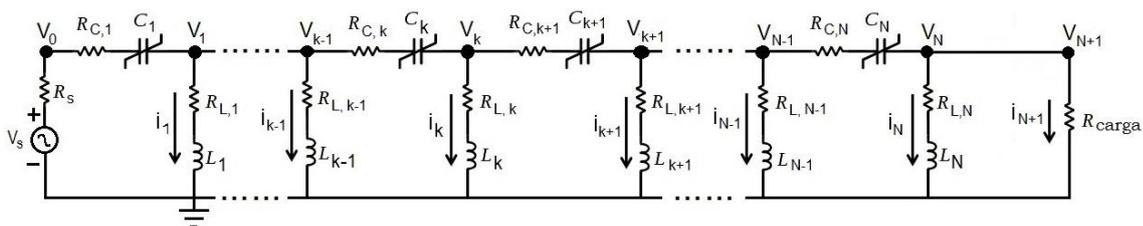


Figura 2: Linha discreta do tipo CL.



Seu princípio de operação é baseado nas propriedades não lineares, dos componentes discretos que compõem a linha, ou seja, da indutância  $L(I)$  e ou capacitância  $C(V)$ . A aplicação de um pulso com determinado tempo de subida ( $t_r$ ) na entrada desta linha, composta por elementos não lineares, produzirá na saída da mesma um pulso modificado. Esta modificação pode ser a redução do tempo de subida, técnica utilizada para a compressão do pulso, ou a produção de oscilações, conhecidas como sólitons.

(b) Linha contínua e não dispersiva (também conhecida como giromagnética) onde o meio que preenche a linha consiste em um material magnético, formado por núcleos magnéticos de ferrita imersos num campo magnético axial externo constante, conforme ilustra a Figura 3:

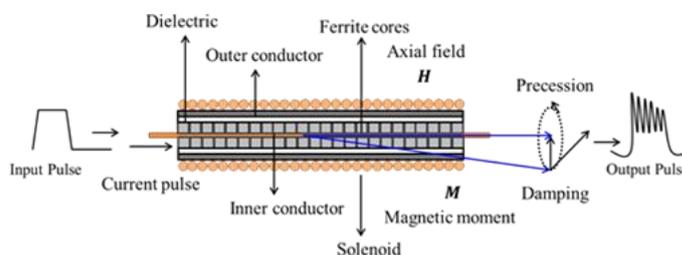


Figura 3: Esquema básico de uma linha giromagnética. [ROSSI *et al.*, 2017]

Seu princípio de operação é baseado na aplicação de um pulso de corrente, onde as oscilações são geradas pela precessão dos momentos de dipolos magnéticos da ferrita quando excitados pelo campo azimutal criado pelo pulso de corrente, cujo campo interage com campo axial magnético externo, gerando um sinal de RF ao longo da linha e na saída do dispositivo.

Vale a pena ressaltar, que as linhas discretas e contínuas não dispersivas são conceitualmente diferentes. LTNLS contínuas, podem produzir um espectro de frequência bastante amplo, desde 300 MHz, com eficiência de conversão de RF em torno de 10%, e atualmente excedendo frequências de 3,0 GHz [REALE *et al.*, 2014] para possíveis aplicações em comunicações de satélites que requerem frequências de operação na banda S no mínimo. Por outro lado, LTNLS discretas operam em frequências mais baixas na faixa de 5 – 300 MHz [RAIMUNDI, 2019][SILVA NETO *et al.*, 2016].

Nesse sentido, o foco deste trabalho será no estudo das linhas de transmissão não lineares contínuas, ou seja, em LTNLS giromagnéticas, pois em contraposição às fontes tradicionais de micro-ondas (klystrons, magnetrons, monotrons, TWTs) os efeitos produzidos por estas linhas abrem novas possibilidades para a realização de conversão direta de pulsos de corrente em oscilações de RF na banda S.

## 2.2 Análise e Modelagem de LTNLS Giromagnéticas

Os processos não lineares não podem ser analisados em estruturas discretas, e desta forma não podem ser analisados com base no simulador SPICE de circuitos, normalmente usados com grande sucesso em linhas discretas. Assim tais processos não lineares devem ser examinados através de simulações numéricas unidimensionais, chamadas de 1D ou bidimensionais, chamadas de 2D.



Na simulação 1D, inicialmente divide-se o pulso de entrada em intervalos regulares e a LTNL contínua em seções de igual comprimento, onde se especificam as condições iniciais em termos de vetores de magnetização inicial e campo magnético externo axial. A Figura 4 ilustra o esquema que representa o algoritmo, onde em cada seção da linha para cada ponto do pulso de entrada é calculada a velocidade de fase da onda a partir da impedância da linha, que por sua vez depende da permeabilidade da ferrita.

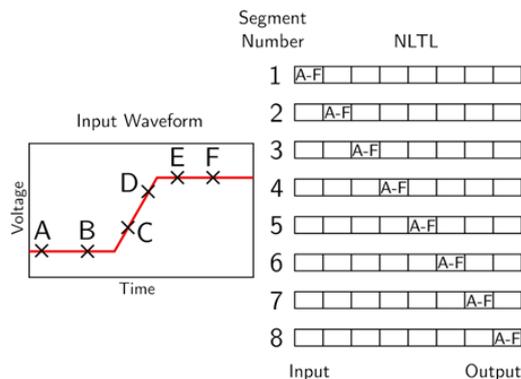


Figura 4: Diagrama para a simulação numérica 1-D. [VASELAAR, 2011]

Esta informação é combinada com o comprimento de cada seção para calcular o tempo de propagação. Este intervalo de tempo calculado é então usado para o cálculo da precessão magnética devido ao efeito da aplicação do pulso em cada seção, de acordo com a equação LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) abaixo:

$$\partial \vec{M} / \partial t = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_s} [\vec{M} \times \partial \vec{M} / \partial t] \quad (1)$$

onde  $\vec{M}$  é o vetor de magnetização,  $\vec{H}$  vetor do campo magnético axial,  $M_s$  a magnetização na saturação,  $\gamma$  o raio giromagnético do elétron e  $\alpha$  a constante de amortecimento da precessão que depende do material. A precessão  $d\vec{M}/dt$  dos domínios magnéticos é então usada para calcular a tensão induzida em cada seção da linha, de acordo com a expressão abaixo obtida através da manipulação das equações do telegrafista para a linha coaxial como:

$$v = \frac{d\phi}{dt} = L_0 \frac{di}{dt} + \mu_0(b - a) \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

onde  $\phi$  é o fluxo magnético,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo,  $b$  o raio externo e  $a$  o raio interno do anel de ferrita. O algoritmo é iterativo, pois o resultado fornecido por (2) é usado para determinar a variação da permeabilidade da ferrita e, por sua vez, novamente usado para calcular a impedância da linha e, concomitantemente, a velocidade de propagação em cada seção para cada ponto subsequente do pulso de entrada. O resultado da simulação é normalmente uma onda de choque de saída com tempo de subida reduzido quando comparado ao do pulso de entrada, por causa da queda da permeabilidade da ferrita, superposta por oscilações de RF devido ao efeito de precessão magnética dos momentos de dipolo.

Já no caso de simulação 2-D, em vez de se usar (2), trabalha-se diretamente com as equações de Maxwell acopladas à equação LLG, o que aumenta o nível de complexidade para a implementação do algoritmo.



### 3. Resultados e Discussão Preliminares

O que se espera como resultados preliminares através das simulações numéricas 1-D e 2-D está ilustrado nos dados fornecidos por Ahn *et al.* [AHN *et al.*,2015] na Figura 5. Neles, pode-se ver que a simulação 2-D oferece resultados melhores por causa da boa concordância com o experimento, embora ainda a simulação 1-D possa ser melhorada se considerar o modo TEM de propagação na LTNL [ROSSI *et al.*,2017].

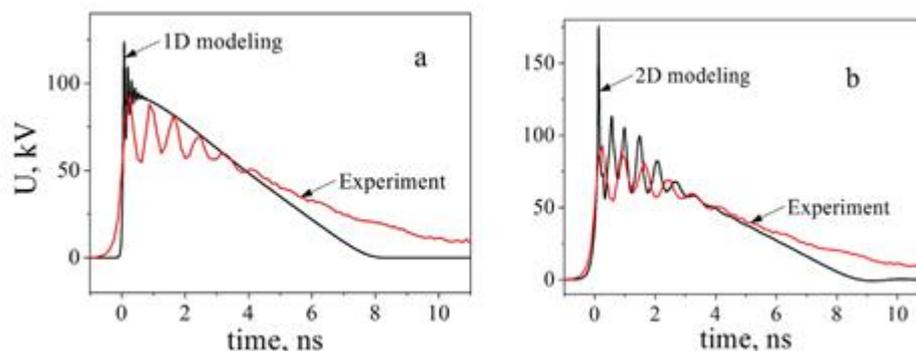


Figura 5: Comparação de simulações numéricas (1-D e 2-D) e experimentais [AHN *et al.*, 2015]

### 4. Conclusão

Pesquisas vêm demonstrando a aplicabilidade de linhas de transmissão não lineares (NLTLs) em diversos campos. Por exemplo, linhas de transmissão não lineares podem ser usadas como transformadores de fase, compressores de pulso, multiplicadores de frequência e antenas compactas.

Estudos no Brasil e no exterior estão sendo feitos no sentido de gerar rádio frequência de alta potência para diversas aplicações, como por exemplo, em sistemas embarcados no espaço usando sistemas compactos sem emprego de tubos eletrônicos. Ainda, cabe lembrar que neste campo de pesquisa em simulações de linhas giromagnéticas, além do Brasil apenas mais três países estão realizando, entre eles, Estados Unidos, Rússia e Ucrânia.

Contudo, para analisar mais detalhes importantes das NLTLs giromagnéticas, se faz necessário a implementação de um modelo numérico para simular seu comportamento. Este modelo é baseado nas equações do telegrafista acopladas à equação macroscópica de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG), que descreve a dinâmica de precessão dos momentos magnéticos do material que preenche a estrutura coaxial da linha. Neste caso, a simulação é conhecida como numérica unidimensional (1-D). Contudo, se as equações de Maxwell são acopladas à equação LLG, a simulação torna-se bidimensional (2-D).

**Agradecimentos:** Ana Flávia Guedes Greco agradece à CAPES pelo financiamento e apoio a este trabalho.



## Referências

Ahn, J.-W.; Karelin, S. Y.; Kwon, H.-O. I.; Magda, I.; Sinitsin, V. G. (2015) "Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite: 2D approach". *Journal of Magnetism*, v.100, n. 6, pp. 68-72.

Raimundi, L. R.; Rossi, J. O.; Lopes Rangel, E.G.; Silva, L.C.; Schamiloglu, E. (2019) "High-Voltage Capacitive Nonlinear Transmission Lines for RF Generation Based on Silicon Carbide Schottky Diodes". *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 47, n. 1, pp. 566–573.

Reale, D.V.; Bragg, J.-W.B.; Golsalves, N.R.; Johnson, J.M.; Neuber, A.A.; Dickens, J.C.; Mankowski, J.J. (2014) "Bias-field controlled phasing and power combination of gyromagnetic nonlinear transmission lines". *Rev.Sci. Instrum.*, v. 85, 054706.

Rossi, J.O.; Yamasaki, F.S.; Barroso, J.J.; Schamiloglu, E.; Hasar, U. (2017) "Operation Analysis of a Novel Concept of RF Source Known as Gyromagnetic Line". In *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Águas de Lindoia, SP, Brasil, pp. 1-4.

Silva Neto, L.P. (2016) "Linhas de Transmissão não Lineares para a Geração de RF Aplicáveis em Sistemas de VHF". Dissertação de doutorado, Laboratório de Plasma, INPE, S.J. Campos, SP, Brasil.

Silva Neto, L.P.; Rossi, J.O.; Barroso, J. J.; Schamiloglu, E. (2016) "High-Power RF Generation from Nonlinear Transmission Lines with Barium Titanate Ceramic Capacitors". *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 44, n. 12, pp. 3424–3431.

Vaselaar, A. (2011) "Experimentation and modeling of pulse sharpening and gyromagnetic precession with a nonlinear transmission line". M.S. thesis, Electrical Eng. Dept., Texas Tech Univ., Lubbock, TX.